ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ







Научная статья
УДК 669.017.16:539.384
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-3-54-59

Баллистическая стойкость стали со структурой естественного феррито-мартенситного композита

В. Н. Пустовойт, Ю. В. Долгачев, Ю. М. Домбровский
Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Для стальных броневых материалов актуальным является снижение толщины и металлоемкости защитной конструкции. Разработанный ранее класс материалов со структурой естественного феррито-мартенситного композита (ЕФМК) имеет характеристики, благоприятствующие торможению развития трещины при ударных нагрузках. В связи с этим он имеет хорошие перспективы применения в качестве броневого материала.

Постановка задачи. Целью данной работы была оценка возможности применения ЕФМК-материалов для устройств броневой защиты на основе результатов испытаний баллистической стойкости при сосредоточенном ударе большой мощности (снарядом, летящим с гиперскоростью).

Теоретическая часть. Исследование баллистической стойкости проводили на образцах из стали 14Г2, обработанных по различным режимам. Образцы имели форму пластин и квадратную сетку на поверхности. Проводились имитационные испытания воздействия термоупрочненных дюбелей из монтажного пистолета и обстрел боевым стрелковым оружием на полигоне из снайперской винтовки СВД и автомата АК-74 боеприпасами заводского снаряжения. Результаты имитационных испытаний показали явное преимущество стали со структурой ЕФМК. Сравнение результатов обстрела боевым стрелковым оружием показало, что баллистическая стойкость стали со структурой ЕФМК зависит от соотношения объемных долей феррита и мартенсита, которые обусловливают разную толщину вязкой и прочной составляющих композита. Наибольшая стойкость наблюдалась у образца со структурой ЕФМК, обработанного по режиму: закалка при 730°C и отпуск при 180°C.

Выводы. Стали со структурой ЕФМК могут обеспечить эффективную защиту воинского персонала при меньшей материалоемкости устройств броневой защиты, что обусловлено особым способом торможения разрушения при локальном ударе большой мощности. Поэтому практическое применение разработанного класса естественных композиционных материалов представляется перспективным для получения броневого листа с меньшей толщиной, что способствует снижению веса боевых машин, повышению их мобильности и уменьшению расхода горючего.

***Ключевые слова*:** сталь, композит, феррит, мартенсит, разрушение, трещиностойкость, термическая обработка.

***Для цитирования*:** Пустовойт, В. Н. Баллистическая стойкость стали со структурой естественного феррито-мартенситного композита / В. Н. Пустовойт, Ю. В. Долгачев, Ю. М. Домбровский // Безопасность техногенных и природных систем. — 2022. — № 3. — С. 54−59. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-3-54-59

Original article

Ballistic Resistance of Steel with the Structure of a Natural Ferrite-Martensitic Composite

V. N. Pustovoit, Yu. V. Dolgachev, Yu. M. Dombrovskii
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. For steel armor materials, it is important to reduce the thickness and, consequently, the metal consumption of the protective structure. The previously developed class of materials with the structure of a natural ferrite-martensite composite (NFMC) has characteristics that favor the inhibition of crack development under impact loads and has prospects as an armor material.

Problem Statement. The purpose of this work is to evaluate the possibility of using NFMC materials for armor protection devices based on the results of ballistic resistance tests under a high-power concentrated impact (a projectile flying at a hyper-high speed).

Theoretical Part. The study of ballistic resistance was carried out on samples of steel 14G2 processed according to various modes. The samples had the shape of plates and a square grid on the surface. Simulation tests of the impact of heat-strengthened dowels from a powder-actuated tool and firing of military small arms at the testing site from an SVD sniper rifle and an AK-74 assault rifle with machine loading ammunition were carried out. The results of simulation tests showed a clear advantage of steel with the NFMC structure. The comparison of the results of firing with military small arms has showed that the ballistic resistance of steel with the NFMC structure depends on the ratio of the volume fractions of ferrite and martensite, which cause different thicknesses of the ductile and strong components of the composite. The highest resistance was observed for a sample with an NFMC structure processed according to the regime: quenching 730°C and tempering 180°C.

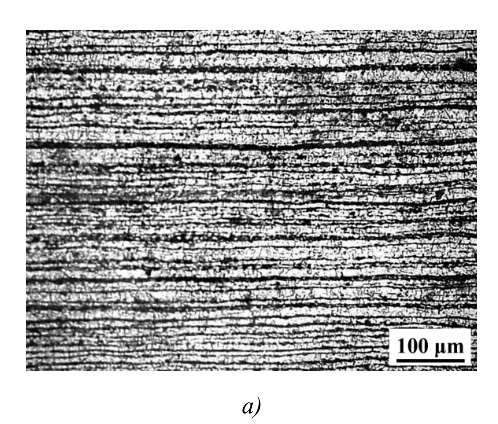
Conclusions. Steels treated for the NFMC structure can provide effective protection for military personnel with a lower material consumption of armor protection devices, which is due to a special method of braking destruction during a high-power local impact. Thus, the practical application of the developed class of natural composite materials seems promising for obtaining an armor plate with a thinner thickness, which helps to reduce the weight of combat vehicles, increase their mobility and reduce fuel consumption.

Keywords: steel, composite, ferrite, martensite, fracture, crack resistance, heat treatment.

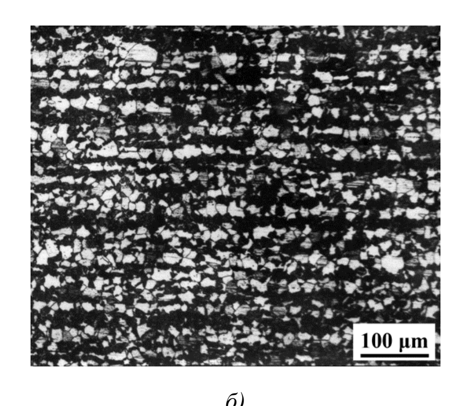
For citation: Pustovoit V. N., Dolgachev Yu. V., Dombrovskii Yu. M. Ballistic Resistance of Steel with the Structure of a Natural Ferrite-Martensitic Composite. Safety of Technogenic and Natural Systems, 2022, no.3, pp. 54−59. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-3-54-59

Введение. В настоящее время в качестве защитного материала боевых машин пехоты, боевых машин десанта и бронетранспортеров применяется стальной горячекатаный лист, имеющий в состоянии поставки феррито-перлитную структуру. Броня, изготовленная из листа с такой структурой, не обеспечивает необходимую защиту при локальных соударениях большой мощности и легко пробивается ручным гранатометом, подствольным гранатометом и даже стрелковым оружием с высокой поражающей способностью — снайперской винтовкой СВД калибра 7,62 с бронебойным патроном с вольфрамовым сердечником, новой снайперской винтовкой калибра 12,7. Увеличение толщины броневого листа (больше 25 мм) серьезно ухудшает мобильность боевых машин на поле боя, увеличивает вес и расход горючего.

В работах [1, 2] обоснована возможность создания стали со структурой естественного феррито-мартенситного композита (ЕФМК) на основе использования доэвтектоидных сталей со строчечной феррито-перлитной структурой. Закалка такой стали из межкритического интервала температур (A_1–A_3) даёт возможность получить слоистую структуру феррито-мартенситного композита (рис. 1). Исследование свойств рассматриваемых сталей при статическом растяжении и ударном изгибе даёт основание полагать, что для такой структуры характерным является особый механизм торможения развития трещины [2].



а)



б)

Рис. 1. Структура стали марки 14Г2: *а* — строчечная феррито-перлитная;
б — после закалки от температуры 760°С

Постановка задачи. Целью настоящей работы является определение возможности применения сталей со структурой ЕФМК для устройств броневой защиты (индивидуальная защита воинского персонала, защита БТР, БМП, БМД от поражения при стрельбе из стрелкового оружия и гранатометов). На основе сформулированной цели ставится задача получения данных о баллистической стойкости мишени из стали со структурой ЕФМК при сосредоточенному ударе большой мощности снарядом, летящем с гипервысокой скоростью (> 800 м/с).

Методика проведения исследований. Исследование баллистической стойкости проводили на образцах стали 14Г2, обработанных по режимам, представленным в таблице 1. Образцы для испытаний представляли собой пластины размером 150×44×7 мм. Поверхность образцов шлифовали, а затем рейсмусом на поверхность наносили сетку с шагом 3 мм в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Таблица 1

Характеристики образцов стали 14Г2 для испытаний
на баллистическую стойкость

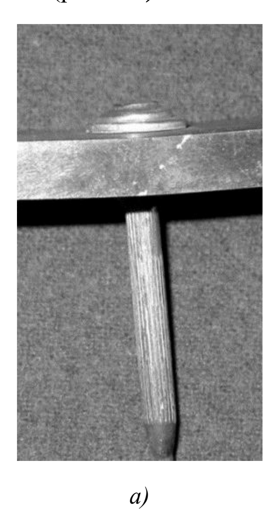
№ образца	Режим обработки	Объемное соотношение феррит/мартенсит после закалки	Твердость, $HRC_Э$
1	состояние поставки	–	< 20
2	закалка 860°С + отпуск 400 °С	0/100	38÷40
3	закалка 730°С + отпуск 180 °С	65/35	42÷44
4	закалка 760°С + отпуск 180 °С	45/55	42÷44

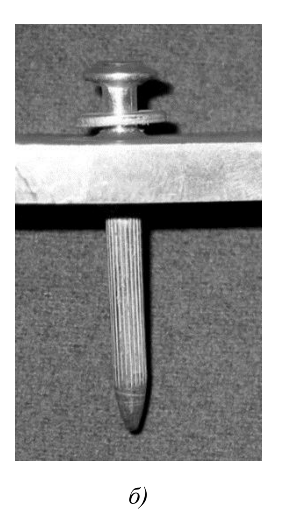
Предварительно проводили имитационные испытания пластин-мишеней воздействию термоупрочненных дюбелей (диаметром 4,5 мм) с помощью монтажного поршневого пистолета ПЦ-8 (применялись дульные гильзы Д-4 максимальной мощности).

Далее с целью испытаний при воздействии ударом большой мощности (снарядом, летящим с гипервысокой скоростью) был проведен отстрел боевым стрелковым оружием на полигоне одной из воинских частей МО РФ, дислоцированной в непосредственной близости от г. Ростова-на-Дону. Из имеющегося арсенала были выбраны два вида отечественного стрелкового оружия с наиболее высокой поражающей способностью: снайперская винтовка СВД калибра 7,62 мм и автомат АК-74 калибра 5,45 мм. Оба вида были обеспечены боеприпасами заводского снаряжения двух типов: лёгким патроном со стальным сердечником и бронебойным с вольфрамовым сердечником в медных обечайках. Отстрел производили с дистанции 45 метров, позволяющей вести прицельный огонь, учитывая отсутствие специальных мер на полигоне по предотвращению рикошета. Увеличение дистанции обстрела, по сравнению с рекомендуемой стандартами на пулестойкость дистанции в 10 метров, не должно существенно сказаться при сравнении этого параметра со справочными данными, учитывая высокую скорость пуль и оценку характера поражений для этих видов оружия: винтовка СВД — патрон 7,62 мм с пулей ЛПС и Б-32, масса 9,6÷10,4 г, скорость 800÷840 м/с; автомат АК-47 — 5,45 мм с пулей ПС и БС, масса 3,5÷3,8 г, скорость 890÷910 м/с.

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты предварительных имитационных испытаний при воздействии дюбелем монтажного пистолета иллюстрирует рис. 2. Видно, что в состоянии поставки (рис. 2 *а*) пластина простреливается насквозь до упора дюбеля. После полной закалки и отпуска при температуре 400 °С пластина простреливается, но дюбель упора не достигает (рис. 2 *б*). Выстрел в пластину со

структурой ЕФМК (образец № 4, таблица 1) приводит к разрушению дюбеля без существенных повреждений пластины (рис. 2 *в*).


а)


б)

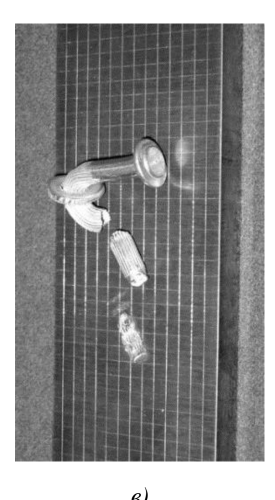

в)

Рис. 2. Результаты имитационных испытаний пластин-мишеней из стали 14Г2 при стрельбе монтажным пистолетом: *а* — образец № 1; *б* — образец № 2; *в* — образец № 4

Проведенные имитационные испытания показали явное преимущество стали со структурой ЕФМК. Однако, энергия дюбеля, сообщаемая ему пороховым зарядом дульной гильзы, меньше, чем энергия сосредоточенного удара снаряда, летящего с гипервысокой скоростью. Поэтому проводили отстрел образцов № 3 и № 4 (таблица 1) со структурой ЕФМК с использованием боевого стрелкового оружия. Сравнение результатов испытаний показало, что баллистическая стойкость стали со структурой ЕФМК зависит от соотношения объемных долей феррита и мартенсита, которые обусловливают разную толщину вязкой и прочной составляющей композита. Так, образец № 4 с малой толщиной пластины вязкого феррита и низким содержанием углерода в мартенситной фазе почти всегда пробивается насквозь бронебойными пулями калибра 7,62 мм и 5,45 мм (рис. 3). Вместе с тем, образец № 3, имеющий также структуру ЕФМК, но бóльшую толщину ферритной фазы и прочность мартенситного слоя, при обстреле бронебойными пулями насквозь не пробивается. Пуля проникает в металл на 2–3 мм и рикошетирует. При этом на тыльной стороне образуется небольшая трещина (рис. 4).

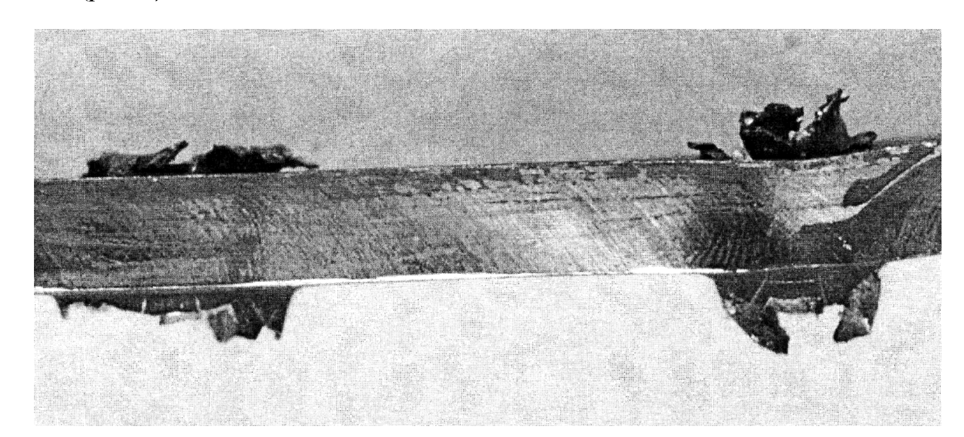
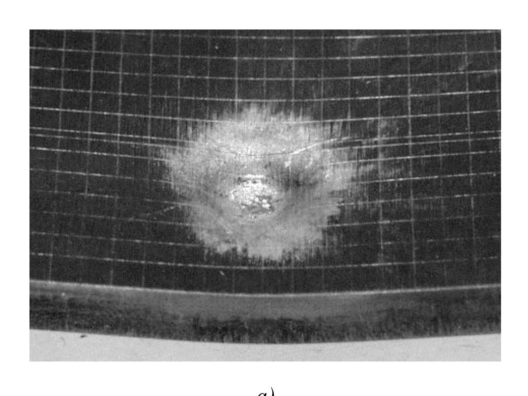
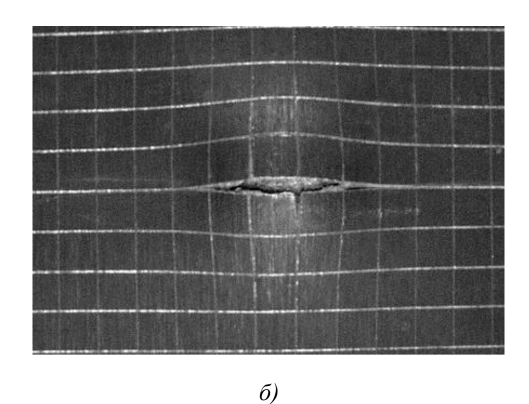


Рис. 3. Сквозное пробитие бронебойными пулями калибра 7,62 и 5,45 мм. Остатки медной обечайки в пробоинах. Режим обработки: закалка при 760 °С и отпуск при 180 °С





а) *б)*

Рис. 4. Пробитие отсутствует, результат рикошетирования: *а* — вид со стороны поражения; *б* — вид с тыльной стороны. Режим обработки: закалка с 730 °C и отпуск 180 °C

По данным, содержащимся на сайте бюро научно-технической информации «Техника для спецслужб» [3], широко используемая броневая сталь СПС-43 [4], выпускаемая по ТУ 0902-005-31041642-95 при обстреле из винтовки СВД с патроном ЛПС требует двухслойного листа общей толщиной 8,3 мм. Созданный авторами естественный композиционный материал выполняет задачу пулестойкости при поражении этим видом оружия при толщине 7 мм.

Высокая баллистическая стойкость стали со структурой ЕФМК обусловлена особым механизмом движения трещины в стали, структура которой организована в виде параллельных слоев пластичного, вязкого феррита и прочного мартенсита. При подходе трещины к поверхности раздела мартенсит-феррит на ней (или около неё) возникает расслоение в феррите вследствие наличия растягивающих напряжений, параллельных плоскости трещины [5–9]. В этом случае часть подводимой извне энергии расходуется на образование поверхности расслоения в феррите. Выход трещины в расслоение приводит к изменению её траектории, остановке продвижения и релаксации растягивающих напряжений в её вершине. Для разрушения следующего слоя композита (мартенситного слоя) в нём должна образоваться новая трещина, но уже в условиях, близких к одноосному напряженному состоянию, на что потребуется дополнительная энергия.

В работе [6] условие возникновения расслоения записано в следующем виде:

$$\sigma \geq \frac{K_D}{\varphi\sqrt{c}}, \quad (1)$$

где K_D — некоторое критическое значение коэффициента интенсивности напряжений; $\varphi = \frac{3+\nu}{1+\nu}$ — константа (ν — коэффициент Пуассона); c — толщина хрупкого слоя (мартенсита).

При этом показано, что для возникновения расслоения впереди мартенситной трещины (до разрушения следующего хрупкого слоя) необходимо, чтобы $\sigma_{\text{р}} < \sigma < \sigma_{0,2}$ и, следовательно, условие возникновения расслоения, тормозящее разрушение слоистого образца, имеет вид:

$$K_D \leq \varphi\sqrt{\frac{E\sigma_{0,2}h\upsilon}{\alpha\beta}}, \quad (2)$$

где h — толщина пластичного слоя (феррита); υ — максимальная величина смещения в пластичном слое; $\alpha = \frac{1+\nu}{3-\nu}$ и $\beta = \frac{4}{3-\nu}$ — константы.

Величина $K_D \sim \sqrt{\gamma_s n_s^2}$, тогда условие (2) примет следующий вид:

$$\sqrt{\gamma_s n_s^2} < \theta\sqrt{a\upsilon}, \quad (3)$$

где γ_s — предельная деформация сдвига в ферритной пластине; n_s — показатель упрочнения при сдвиге; $\theta = \varphi\sqrt{\frac{E}{\alpha\beta}}$ — константа.

Если толщина пластичного слоя феррита в многослойном образце достаточна для выполнения условия (3), то образуется расслоение, препятствующее дальнейшему продвижению магистральной трещины. Для стали марки 14Г2 при значениях γ_s примерно 1000 МПа и $n_s = 0{,}43$ расслоение возникает при соотношении $\frac{h}{c} \geq 3$. Такое соотношение имеет место при закалке стали марки 14Г2 с температур от 730°С до 740°С межкритического интервала [10–12].

Выводы. Таким образом, результаты определения баллистической стойкости стали со структурой ЕФМК показали, что при меньшей материалоемкости она может обеспечить эффективную защиту воинского персонала, что обусловлено особым способом торможения разрушения при локальном ударе большой мощности. Практическое применение разработанного класса естественных композиционных материалов

представляется перспективным для получения броневого листа с меньшей толщиной, что способствует снижению веса боевых машин, повышению их мобильности и уменьшению расхода горючего.

Библиографический список

1. Способ получения естественного феррито-мартенситного композита : патент № 2495141 Рос. Федерация : C21D 8/00, C21D 8/02 / В. Н. Пустовойт, Ю. М. Домбровский, А. В. Желева, М. В. Зайцева. — № 2012119557/02 ; заявл. 11.05.2012 ; опубл. 10.10.2013. Бюл. № 28. — 7 с.

2. Structural Organization and Properties of a Natural Ferrite-Martensite Steel Composite / V. N. Pustovoit, Y. V. Dolgachev, Y. M. Dombrovskii, V. V. Duka // Metal Science and Heat Treatment. — 2020. — No. 62 (5–6). — P. 369–375. http://dx.doi.org/10.1007/s11041-020-00570-9

3. Броневая сталь «СПС-43» // Бюро научно-технической информации «Техника для спецслужб» : [сайт]. — URL: http://www.bnti.ru/des.asp?itm=2390&tbl=08.02.05.&ysclid=l5mi3koutt157231786 (дата обращения : 10.06.2022).

4. СТАЛЬ СПС-43: патент 2123062 Рос. Федерация : С 22 С 38/50 / А. В. Петров, Г. А. Просвиряков, М. В. Сильников — № 97115821/02 ; заявл. 23.09.1997 ; опубл. 10.12.1998. — 6 с.

5. Cooper, G. A. Tensile properties of fibre-reinforced metals: fracture mechanics / G. A. Cooper, A. Kelly // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. — 1967. — No. 15(4). — P. 279–297.

6. Greif, R. The Effect of a Stringer on the Stress in a Cracked Sheet / R. Greif, J. L. Sanders // ASME. J. Appl. Mech. — 1965. — No. 32 (1). — P. 59–66. https://doi.org/10.1115/1.3625784

7. Bloom, J. M. The Effect of a Riveted Stringer on the Stress in a Cracked Sheet / J. M. Bloom, J. L. Sanders // ASME. J. Appl. Mech. — 1966. — No. 33 (3). — P. 561–570. https://doi.org/10.1115/1.3625122

8. Sanders, J. L. Effect of a stringer on the stress concentration due to a crack in a thin sheet / J. L. Sanders. — Washington: National Aeronautics and Space Administration, 1959. — No. 4207. — 10 p.

9. Poe, C. C. Stress intensity factor for a cracked sheet with riveted and uniformly spaced stringers / C. C. Poe. – Washington: National Aeronautics and Space Administration, 1971. — №. L-6826. — 64 p.

10. Пустовойт, В. Н. Сценарий роста трещины в стали со структурой ферритно-мартенситного композита / В. Н. Пустовойт, В. В. Дука, Ю. В. Долгачев // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2017. — № 10 (205). — С. 118–121.

11. Features of destruction of a ferrite-martensitic composite / V. N. Pustovoit, V. V. Duka, Y. V. Dolgachev [et al.] // MATEC Web of Conferences. — 2018. — Vol. 226. — P. 03006. http://dx.doi.org/10.1051/matecconf/201822603006

12. Усталостное разрушение стали со структурой феррито-мартенситного композита / В. Н. Пустовойт, С. А. Гришин, Ю. В. Долгачев, В. В. Дука // Известия вузов. Черная металлургия. — 2022. — Т. 65, № 2. — С. 92–97. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-2-92-97

Поступила в редакцию 11.06.2022
Поступила после рецензирования 12.07.2022
Принята к публикации 12.07.2022

Об авторах:

Пустовойт Виктор Николаевич, профессор кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» Донского государственного технического университета, (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID, fipm-dstu@mail.ru

Долгачев Юрий Вячеславович, доцент кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» Донского государственного технического университета, (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID, yuridol@mail.ru

Домбровский Юрий Маркович, профессор кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» Донского государственного технического университета, (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID, yurimd@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

В. Н. Пустовойт — формирование основной концепции, цели и задач исследования, научное руководство, подготовка текста, формирование выводов; Ю. В. Долгачев — проведение расчетов, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов; Ю. М. Домбровский — подготовка образцов для исследования, проведение имитационных испытаний, проведение металлографического анализа.